

УДК 621.312

ОПТИМИЗАЦИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Ю.П. Кубарьков, И.С. Кулаев, Р.А. Алехин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Несмотря на преимущества возобновляемой распределенной энергии, увеличение ее объема приводит к серьезным изменениям характеристик электрической сети. Это особенно заметно в сетях низкого и среднего напряжения. На сегодняшний день основной метод регулирования напряжения в России – поддержание заданных уровней напряжения в контрольных точках распределительной сети. Существующая централизованная система регулирования режимных параметров не обеспечивает эффективности управления напряжением в сетях. Традиционные способы компенсации индуктивной реактивной мощности выполняются с помощью шунтирующих конденсаторных батарей. Такая установка оказывает и другие положительные эффекты на систему: повышение напряжения на нагрузке, лучшее регулирование напряжения (если батареи были надлежащим образом спроектированы), уменьшение потерь и сокращение или отсрочка инвестиций в передачу. Растущие возможности силовых электронных компонентов инициировали использование устройств FACTS. Более высокие уровни мощности стали доступны в конвертерах для самых высоких напряжений. Общие отправные точки – это сетевые элементы, влияющие на импеданс или реактивную мощность в отдельных частях энергосистемы.*

Альтернативой традиционному способу регулирования напряжения является интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной электрической сетью и мультиагентной системой управления.

Эффективность мультиагентного регулирования выше, чем у традиционных методов регулирования напряжения в распределительных сетях, что обусловлено адаптивностью системы и работой в режиме реального времени. Мультиагентное регулирование обеспечивает эффективное регулирование напряжения в рамках интересов всех субъектов, участвующих в процессе.

Внедрение интеллектуальной адаптивной системы регулирования напряжения способствует снижению потерь электроэнергии, повышению качества снабжения потребителей, повышению надежности системы и ее уровня пропускной способности.

Ключевые слова: интеллектуальная электрическая система, активно-адаптивная сеть, мультиагентное регулирование, источник реактивной мощности, стабилизация напряжения, потери мощности и энергии.

Напряжение в распределительных сетях постоянно изменяется. Это вызвано тем, что постоянно меняются нагрузка в сети, режим работы генераторов станций, топология сети. Режимы напряжения в сетях регламентируются ГОСТ 32144-2013. Однако по различным причинам отклонения напряжения в сетях ча-

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».
Игорь Сергеевич Кулаев, студент.
Роман Александрович Алехин, аспирант.*

сто превышают допустимые. Основными причинами падения напряжения в распределительных сетях являются: большие токи нагрузки, неправильный выбор сечений проводников и мощностей трансформаторов, неправильная топология распределительных сетей [1]. Поэтому для поддержания уровня напряжения в заданных рамках используют регулирование напряжения. В нашей стране основными средствами регулирования являются средства регулирования в трансформаторах (РПН, ПБВ), а также регуляторы возбуждения генераторов на станциях. В крупных разветвленных энергетических системах традиционные способы регулирования напряжения оказываются недостаточно эффективными.

На Западе давно ведутся разработки интеллектуальных энергосистем – Smart Grid. Согласно определению, Smart Grid – это модернизированные электрические сети, которые используют информационные и коммуникационные технологии для сбора информации о выработке и потреблении электроэнергии, позволяющей автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

В России ведутся аналогичные исследования и разработки в области интеллектуализации распределительных сетей [2, 3]. Данная разработка имеет название «Интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной сетью». В активно-адаптивных сетях для регулирования напряжения и оптимизации потери мощности используются управляемые устройства компенсации реактивной мощности, которые и определяют адаптивные свойства системы [2].

Устройства регулирования реактивной мощности

Интеллектуализация сетей достигается за счет внедрения новейших устройств сбора и обработки информации, устройств регулирования параметров сети, а также за счет использования управляемых источников активной и реактивной мощности, подключенных к шинам потребителя, за счет чего последние переходят из «пассивных» в «активных» участников энергетической системы.

Для сохранения напряжения в заданных лимитах применяются устройства регулирования реактивной мощности [4, 5].

Самыми простыми и распространенными источниками реактивной мощности являются батареи статических конденсаторов (БСК).

БСК в основном устанавливаются для обеспечения емкостной реактивной компенсации – коррекции коэффициента мощности. Использование БСК увеличилось, поскольку они относительно недороги, легко и быстро устанавливаются и могут быть развернуты практически в любой точке сети.

Их установка оказывает и другие положительные эффекты на систему: повышение напряжения на нагрузке, лучшее регулирование напряжения (если они были надлежащим образом спроектированы), уменьшение потерь и сокращение или отсрочка инвестиций в передачу.

Основным недостатком БСК является то, что их выходная реактивная мощность пропорциональна квадрату напряжения, и, следовательно, когда напряжение низкое и система нуждается в них больше всего, они являются наименее эффективными.

Конденсаторы предназначены для работы при их номинальном напряжении и частоте или ниже, поскольку они очень чувствительны к изменению этих значений; реактивная мощность, создаваемая конденсатором, пропорциональна как напряжению, так и частоте ($kVA_r = 2\pi f v^2$).

БСК являются достаточно надежным и экономичным средством, однако при

наличии быстро изменяющихся реактивных нагрузок применение БСК неэффективно ввиду их малого быстродействия.

Следующей ступенью развития регулирующих устройств является технология гибких линий электропередач переменного тока (FACTS), в состав которых входят устройства регулирования реактивной мощности (СТАТКОМ).

Растущие возможности силовых электронных компонентов инициировали использование устройств FACTS [6, 7, 8]. Более высокие уровни мощности стали доступны в конвертерах для самых высоких напряжений. Это сетевые элементы, влияющие на импеданс или реактивную мощность в отдельных частях энергосистемы. Для устройств FACTS это объясняется двумя причинами. Одно из условий – динамическая устойчивость, которая служит для обеспечения быстрой управляемости устройств FACTS на базе силовой электроники. Это один из основных факторов отличия от обычных устройств. Другое условие – статическая устойчивость, которая обеспечивает выполнение необходимой управляемости при малых изменениях параметров режима, поскольку FACTS не имеет движущихся частей, таких как механические переключатели.

Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) – это устройство, работающее как статический преобразователь реактивной мощности, чей емкостный или индуктивный ток может регулироваться независимо от изменения напряжения сети [6].

СТАТКОМ в основном включают последовательно или как шунтирующее устройство.

Устройства последовательного включения разработаны с механической или фиксированной коммутируемой компенсацией:

- статический синхронный компенсатор (SSSC);
- конденсатор с тиристорным коммутатором (TSSC);
- реактор с тиристорным коммутатором (TSSR);
- конденсатор с тиристорным управлением (TCSC);
- реактор с тиристорным управлением (TCSR).

Шунтирующие устройства работают как компенсаторы реактивной мощности и используются в системах передачи и распределения [9, 10, 11]:

- статический синхронный компенсатор (STATCOM);
- статический компенсатор SVC;
- реактор с тиристорным переключением (TSR);
- тиристорный коммутируемый конденсатор (TSC);
- реактор с тиристорным управлением (TCR);
- механически коммутируемый конденсатор (MSC).

STATCOM – это контролируемый источник реактивной мощности. Характеристика STATCOM аналогична характеристикам синхронного конденсатора, но в качестве электронного устройства он не имеет инерции и лучше синхронного конденсатора, поскольку имеет более низкие эксплуатационные расходы и инвестиционные затраты, лучшую динамику.

Статическая характеристика имеет определенную крутизну между текущими ограничениями (рис. 1), определяющими управляющую кривую напряжения. В распределенной энергетической системе обычно используется преобразователь источника напряжения для межсетевое взаимодействие. Следующим шагом в разработке STATCOM является сочетание с накопителями энергии на стороне постоянного тока. Производительность для сбалансированного функционирова-

ния сети и качества электроэнергии может быть значительно улучшена благодаря сочетанию активной и реактивной мощности.

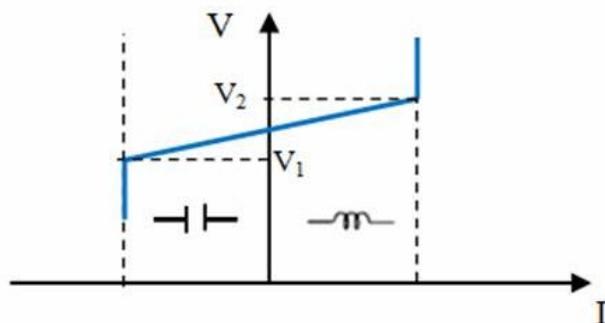


Рис. 1. VI-характеристики STATCOM

СТАТКОМ состоит из следующих элементов (рис. 2):

1. Статический преобразователь, предназначенный для работы в различных режимах потребления и генерации активной и реактивной мощности.
2. Согласующий трансформатор для подключения к шинам высокого напряжения.
3. Звено постоянного тока, которое обеспечивает напряжения.
4. Пассивный фильтр для обеспечения синусоидальности фазных токов.

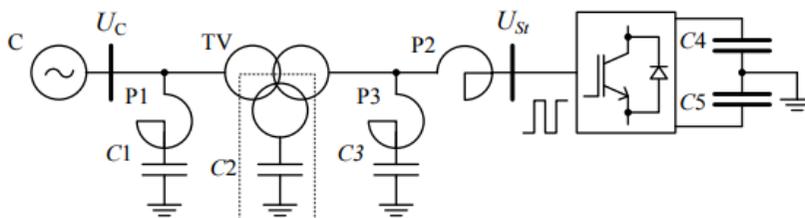


Рис. 2. Упрощенная схема СТАТКОМ

Результаты ряда исследований позволяют заключить, что на данный момент СТАТКОМ – наиболее совершенное устройство компенсации реактивной мощности.

Преимущества СТАТКОМ:

- многофункциональность;
- быстродействие;
- малое содержание высших гармоник;
- малые габариты.

СТАТКОМ обладает много меньшей вероятностью появления перенапряжений, а при уменьшении напряжения может работать в режиме стабильного источника постоянного тока [12–17]. Еще одним плюсом СТАТКОМ является возможность регулирования емкостного тока при снижении напряжения источника, что обеспечит увеличение динамической устойчивости системы по сравнению с СТК.

Мультиагентное регулирование напряжения в распределительных сетях и сравнение его с централизованным регулированием

Для любых систем регулирования общей задачей является достижение целей регулирования. Для централизованного – это сведение потерь активной мощности в распределительных сетях к минимуму или увеличение пропускной способности распределительной сети при поддержании уровня напряжения в допустимом пределе с минимальными отклонениями напряжения узлов сети от номинального. Для мультиагентного – это достижение индивидуальных целей участников процесса регулирования при поддержании напряжений в допустимых пределах.

При децентрализованном (мультиагентном) регулировании напряжения уставки регулирующих устройств определяются локальными регуляторами в режиме реального времени на основании данных режима того района, в котором производится регулирование напряжения [18].

Для воплощения централизованно-распределенного принципа алгоритмы управления согласуются так, чтобы между централизованным и децентрализованными устройствами системы регулирования происходил постоянный обмен информацией, но в случае нарушения связи децентрализованная система выполняла функции управления по собственным алгоритмам.

Работа регулятора напряжения и реактивной мощности основана на следующих принципах:

1. Подстанция представляется в виде эквивалентного объекта с одним входом (суммарная реактивная мощность ИРМ, установленных на подстанции) и одним выходом (напряжение на шинах регулируемого объекта).
2. Применяется пропорционально-интегральный закон для задания реактивной мощности компенсаторов, установленных на подстанции.
3. Рассчитывается управляющее воздействие на управляемые системы компенсации реактивной мощности и устройства РПН трансформаторов.
4. Параметры регулятора могут адаптироваться в зависимости от режимно-топологических параметров сети в режиме реального времени.

Сложность создания децентрализованной системы регулирования напряжения заключается в формировании единого информационного пространства, включающего высокотехнологичные системы мониторинга за системными параметрами, устройства связи и обработки информации, программные комплексы и вычислительное оборудование.

Мультиагентное автоматическое регулирование напряжения в режиме реального времени – это такое регулирование, реализация которого возможна только в высокоавтоматизированных сетях с применением моделирования режима и минимизации потерь активной мощности в сети, поэтому оно считается самым эффективным регулированием.

Оптимизация уровня напряжения участка энергетической системы за счет управления потоками реактивной мощности

Для повышения эффективности работы энергосистемы, снижения потерь активной мощности и выравнивания уровня напряжения производится оптимизация режимов по реактивной мощности. Целью оптимизации является определение мест установки компенсирующих устройств и их мощности для достижения наибольшего эффекта в снижении потерь активной мощности и выравнивании уровней напряжения в узлах сети [19].

Рассматривая энергосистему как структуру от производства электроэнергии до ее потребления, задачу распределения потоков реактивной мощности нужно решать в следующих аспектах:

- оптимальное распределение реактивной мощности между источниками питания;
- оптимальное распределение реактивной мощности внутри распределительной сети;
- регулирование напряжения в сети.

Ограничениями выступают нормативная документация, соответствующие приказы и распоряжения РАО «ЕЭС России» и Министерства промышленности и энергетики РФ.

Сущность регулирования напряжения за счет воздействия на потоки реактивной мощности по элементам электрической сети заключается в том, что при изменении реактивной мощности изменяются потери напряжения в реактивных сопротивлениях.

Продольная составляющая падения напряжения:

$$\Delta U = \frac{PR + (Q \pm Q_{ку})X}{U_2}, \quad (1)$$

где P, Q – активная и реактивная мощности на шинах потребителя;
 R, X – активное и реактивное сопротивление системы от источника питания до шин потребителя;

U_2 – напряжение на шинах потребителя;

$Q_{ку}$ – мощность компенсирующего устройства [20].

Степень воздействия на сеть зависит от места установки компенсирующих устройств (КУ) и их мощности.

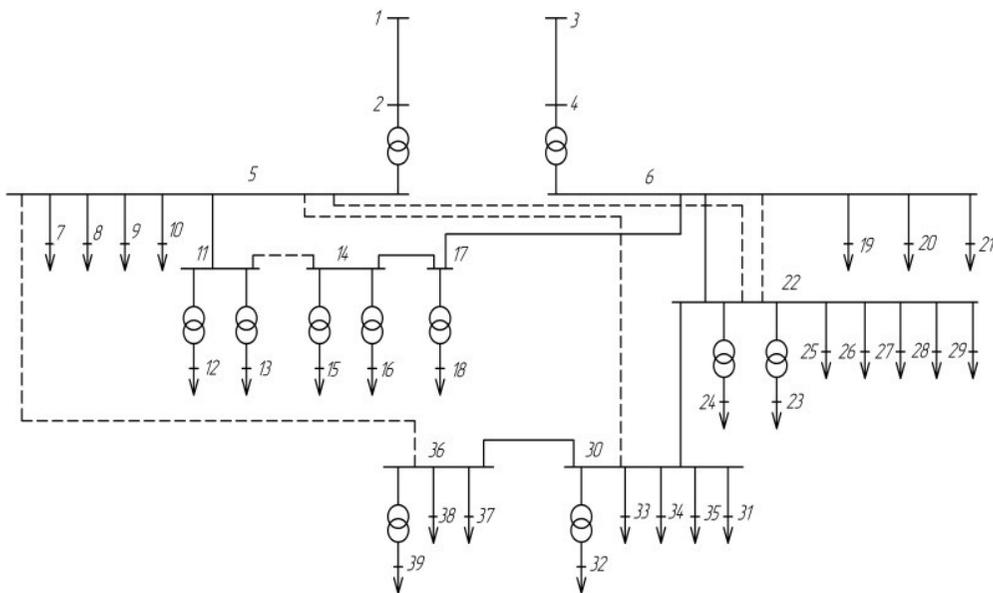


Рис. 3. Схема ПС 35/10 кВ «Водозабор» НПЗ

Целевая функция имеет следующий вид:

$$Ц = f(Q_{ку}; N_{ку}), \quad (2)$$

где $Q_{ку}$ – мощность компенсирующего устройства; $N_{ку}$ – узел, в котором располагается компенсирующее устройство.

В качестве расчетной схемы была выбрана двухтрансформаторная подстанция ЦРП «Водозабор» 35/10 кВ (рис. 3). Схема содержит 39 узлов, 39 линий, из которых в нормальном режиме работают 34, два независимых источника питания, 18 нагрузок на стороне 10 кВ, из них 10 двигателей мощностью более 500 кВт, и 9 нагрузок на стороне 0,4 кВ.

Результаты расчетов базового режима (рис. 4, 5) показали, что наибольшее падение напряжения, максимальные потери мощности и максимальная токовая нагрузка линий будут в узлах 6, 22, 30. Также для узлов 14–39 падение напряжение превышает допустимые 5 % от $U_{ном}$. Для улучшения этих параметров были рассмотрены различные варианты установки компенсаторов реактивной мощности (БСК) различной мощности в различных узлах.

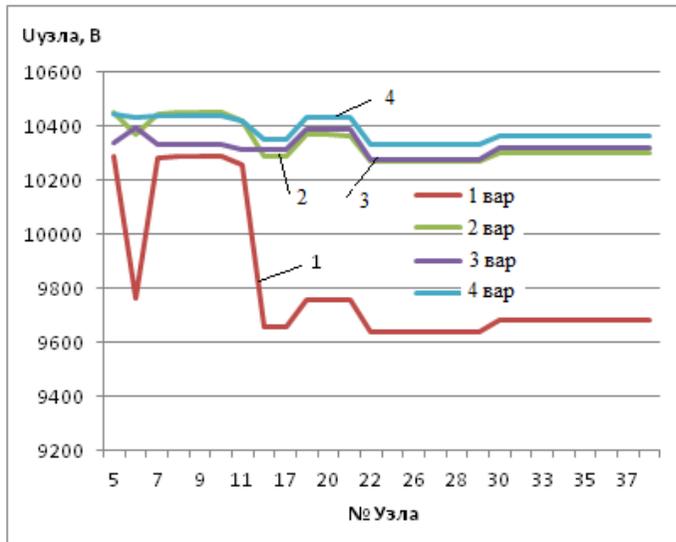


Рис. 4. Уровни напряжения в узлах на стороне 10 кВ

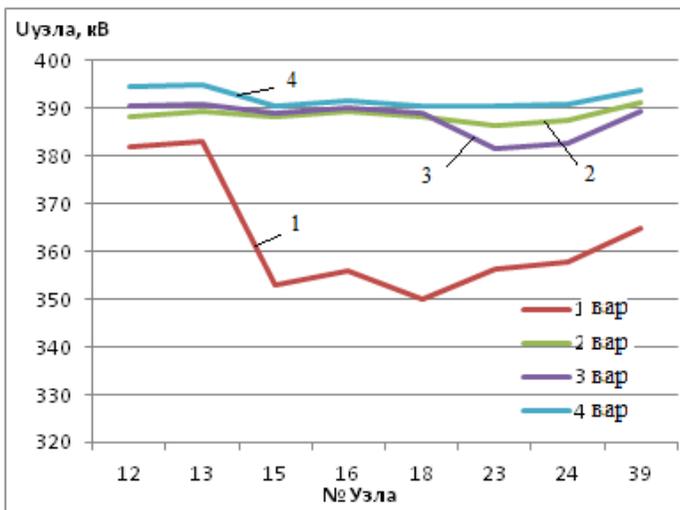


Рис. 5. Уровни напряжения в узлах на стороне 0,4 кВ

Мощность и номер узла БСК для вариантов компенсации

№ вар.	Рабочий режим	Место установки U = 10 кВ	Место установки U = 0,4 кВ
1	Базовый режим	Без БСК	Без БСК
22	БСК 1350 кВар БСК 150 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар БСК 900 кВар БСК 600 кВар	5, 6 14, 23, 24, 32 15 16 18 22 30	5, 6 14, 23, 24, 32 15 16 18 22 30
33	БСК 4050 кВар БСК 200 кВар БСК 180 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар	12 6 13 15 16 18	6 12 13 15 16 18
44	БСК 3150 кВар БСК 900 кВар БСК 200 кВар БСК 180 кВар БСК 300 кВар БСК 250 кВар БСК 375 кВар БСК 600 кВар	6 5 12, 23 13, 24 15 16 18 22	6 5 12, 23 13, 24 15 16 18 22

Вывод

Анализ результатов показал, что при использовании активно-адаптивных элементов:

1. Обеспечивается частичная или полная компенсация негативного воздействия при увеличении нормативных значений отклонения и колебания напряжения, продолжительных провалов напряжения.

2. Увеличивается пропускная способность линий электропередач. Оптимизация пропускной способности ЛЭП обеспечивает возможность поставки дополнительной электроэнергии из смежных систем, а также увеличивает выдачу активных генерирующих мощностей при увеличении максимально допустимых перетоков мощности.

3. Повышается управляемость режимов работы ЭЭС. Включение в состав электроэнергетической системы устройств FACTS способно повысить управляемость работы ЭЭС, перевести потоки активной мощности в линии с более высоким классом напряжения и увеличить степень компенсации зарядной мощности электрической сети.

4. Компенсирующие устройства, установленные в расчетной схеме для поддержания уровней напряжения в допустимых пределах, являются активно-адаптивными элементами и могут быть использованы для создания интеллектуальной сети.

Мультиагентное регулирование обеспечивает эффективное регулирование напряжения в рамках интересов всех субъектов, участвующих в процессе: распределительных компаний, потребителей, распределенной генерации, а также

создает технологическую основу местных рынков услуг по регулированию напряжения в сети.

На сегодняшний день интеллектуальные сети в России находятся на начальном этапе своего развития. На данный момент отечественные энергосистемы практически не развиваются, что способствует их физическому и моральному износу. В связи с этим актуальным становится вопрос развития в нашей стране сетей совершенно иного уровня, в основу которых будут положены передовые достижения современных технологий мировой науки и техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eegr.ru/>
2. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/>
3. *Савина Н.В.* Управление уровнем потерь электроэнергии в активно-адаптивных электрических сетях: учеб. пособие. – Благовещенск: АмГУ, 2014. – 114 с.
4. *Panagis N. Vovos, Aristides E. Kiprais, A. Robin Wallace, and Gareth P. Harrison.* Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 476–483, February 2007.
5. *Kulmala A.* 2014. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources, PhD dissertation, Tampere University of Technology.
6. *Bindeshwar S.* Introduction to FACTS controllers. A critical review / S. Bindeshwar, K. Verma and others // International journal of reviews in computing. – 2011. – Vol. 8. – p. 17–34.
7. *Ghahremani E., Kamwa I.* Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28 (2), 764–778.
8. *Ghasemi A., Valipour K., Tohidi A.* Multi objective optimal reactive power dispatch using a new multi objective strategy. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2014, 57, 318–334.
9. *Palma-Behnke R., Vargas L.S., Perez J.R., Nunez J.D., Torres R.A.* OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems. IEEE Trans. Power Syst. 19 (4), 2004, 1742–1753.
10. *Sebaa K., Bouhedda M., Tlemc ani A., Henini N.* Location and tuning of TCPSTs and SVCs based on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 54, 2014, 536–545.
11. *Sirjani R., Mohamed A., Shareef H.* Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 43 (1), 2012, 562–572.
12. *Sundar K.S., Ravikumar H.M.* 2012. Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 34 (1), 29–37.
13. *Saravanan M., Mary Raja Slochanal S., Venkatesh P., Abraham J.P.S.* Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability. Electrical Power System Research 77: 276–283 (2007).
14. *Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A.* Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 42(1): 334–340 (2012).
15. *Mohamed Idris R., Khairuddin A., Mustafa M.W.* Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using Bees algorithm. World Academy of science Engineering and Technology 3: 313–320 (2009).
16. *Panda S., Padhy N.P.* Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO, J Franklin Institute, 2008, Vol. 345, No. 2, pp. 166–181.
17. *Bian X.Y., Tse C.T., Zhang J.F., Wang K.W.* Coordinated design of probabilistic PSS and SVC damping controllers, Int J Electr Power Energy Syst, 2011, Vol. 33, No. 3, pp. 445–452.
18. *Gelen A., Yalcinoz T.* Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation, Turk J Elec Eng & Comp Sci, 2010, Vol. 18, No. 2, pp. 147–157.
19. *Hari N., Vijayakumar K., and S.S. Dash.* A versatile control scheme for UPQC for power quality improvement, in Proc. Emerging Trends Electr. Comput. Technol., Mar. 23–24, 2011, pp. 453–458.

20. Srinath S., Selvan M.P., and Vinothkumar K. Comparative performance of different control strategies on UPQC connected valuation of distribution system, in Proc. Int. Conf. Ind. Inf. Syst., Jul. 29–Aug. 1, 2010, pp. 502–507.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2018 г.

OPTIMIZATION OF VOLTAGE LEVELS IN ACTIVE-ADAPTIVE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

Y.P. Kubarkov, I.S. Kulaev, R.A. Alekhin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Despite the advantages of renewable distributed energy, an increase in its volume leads to serious changes in the characteristics of the electrical network. This is especially noticeable in low and medium voltage networks. To date, the main method of voltage regulation in Russia is to maintain specified voltage levels at control points of the distribution network. The existing centralized system for regulating the operating parameters does not ensure the effectiveness of voltage control in networks. An alternative to the traditional method of voltage regulation is an intelligent power system with an actively-adaptive electrical network. The effectiveness of multi-agent regulation is higher than that of traditional methods of voltage regulation in distribution networks, this is due to system adaptability and real-time operation. The introduction of an intelligent adaptive voltage regulation system reduces power losses, improves the quality of supply to consumers, increases the reliability of the system and its level of throughput.*

Keywords: *active-adaptive network, multi-agent voltage regulation, reactive power source, intelligent electrical system.*

REFERENCES

1. Directions for the development of voltage regulation and reactive power in the UNEG [Electronic resource] Access mode: <http://eepr.ru/>.
2. The main provisions of the concept of an intelligent power system with an actively-adaptive network [Electronic resource] Access mode: <http://www.fsk-ees.ru/>.
3. Savina N.V. Controlling the level of electricity losses in active-adaptive electrical networks: a textbook / N.V. Savina. – Blagoveshchensk: AmSU, 2014. – 114 p.
4. Panagis N. Vovos, Aristides E. Kiprais, A. Robin Wallace, and Gareth P. Harrison, "Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 476–483, February 2007.
5. Kulmala A. 2014. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources, PhD dissertation, Tampere University of Technology.
6. Bindeshwar S. Introduction to FACTS controllers. A critical review / S. Bindeshwar, K. Verma and others // International journal of reviews in computing. – 2011. – Vol. 8. – p. 17–34.
7. Ghahremani E., Kamwa I. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28 (2), 764–778.
8. Ghasemi A., Valipour K., Tohidi A. Multi objective optimal reactive power dispatch using a new multi objective strategy. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2014, 57, 318–334.
9. Palma-Behnke R., Vargas L.S., Perez J.R., Nunez J.D., Torres R.A. OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems. IEEE Trans. Power Syst. 19 (4), 2004, 1742–1753.
10. Sebaa K., Bouhedda M., Tlemc ani A., Henini N. Location and tuning of TCPSTs and SVCs based

*Yury P. Kubarkov (Doc. of Techn. Scien.), Professor.
Igor S. Kulayev, Student.
Roman A. Alekhin, Postgraduate student.*

- on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 54, 2014, 536–545.
11. Sirjani R., Mohamed A., Shareef H. Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 43 (1), 2012, 562–572.
 12. Sundar K.S., Ravikumar H.M. 2012. Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 34 (1), 29–37.
 13. Saravanan M., Mary Raja Slochanal S., Venkatesh P., Abraham J.P.S. Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability. *Electrical Power System Research* 77: 276-283 (2007).
 14. Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A. Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42(1): 334-340 (2012).
 15. Mohamed Idris R., Khairuddin A., Mustafa M.W. Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using Bees algorithm. *World Academy of science Engineering and Technology* 3: 313–320 (2009).
 16. Panda S., Padhy N.P. Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability improvement using PSO, *J Franklin Institute*, 2008, Vol. 345, No. 2, pp. 166–181.
 17. Bian X.Y., Tse C.T., Zhang J.F., Wang K.W. Coordinated design of probabilistic PSS and SVC damping controllers, *Int J Electr Power Energy Syst*, 2011, Vol. 33, No. 3, pp. 445–452.
 18. Gelen A., Yalcinoz T. Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 2010, Vol. 18, No. 2, pp. 147–157.
 19. Hari N., Vijayakumar K., and Dash S.S. A versatile control scheme for UPQC for power quality improvement, in *Proc. Emerging Trends Electr. Comput. Technol.*, Mar. 23–24, 2011, pp. 453–458.
 20. Srinath S., Selvan M.P., and Vinothkumar K. Comparative performance of different control strategies on UPQC connected valuation of distribution system, in *Proc. Int. Conf. Ind. Inf. Syst.*, Jul. 29–Aug. 1, 2010, pp. 502–507.